

国外电子与通信教材系列

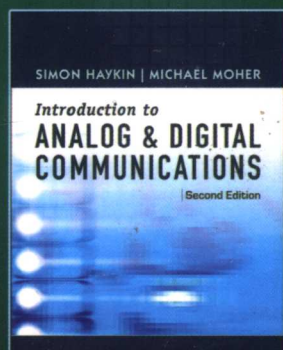
教育部高等理工教育教学改革与实践项目



# 模拟与数字通信导论

(第二版)

Introduction to  
Analog and Digital Communications  
Second Edition



[美] Simon Haykin 著  
Michael Moher

许波 夏玮玮 宋铁成 等译  
沈连丰 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

## 内 容 简 介

本书对模拟通信和数字通信的基本理论和主要技术进行了深入浅出的论述。首先给出了必要的数学基础,包括概率、随机过程以及各类噪声的基本概念和特性,接着分章详细讨论了振幅调制、角度调制、脉冲调制、基带数据传输、数字带通调制以及在模拟和数字通信中的噪声及其影响,附录中给出了10余个用MATLAB模拟的计算机实验。全书从通信系统的角度强调基本概念,在数学语言描述上既通俗易懂又不失其逻辑性和完整性。

本书可作为高等院校通信类、信息类、电子类、计算机类专业本科生的教材,也可供有关技术、科研和管理人员参考。

Simon Haykin, Michael Moher: *Introduction to Analog and Digital Communications, Second Edition.*

ISBN 0-471-43222-9

Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, INC., New York, Chichester, Weinheim, Singapore, Brisbane, Toronto. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和 John Wiley & Sons 合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-6646

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟与数字通信导论: 第2版 / (加)赫金(Haykin, S.)等著; 许波等译.

北京: 电子工业出版社, 2007.2

书名原文: Introduction to Analog and Digital Communications, Second Edition

(国外电子与通信教材系列)

ISBN 978-7-121-03494-7

I. 模... II. ①赫... ②许... III. ①模拟通信—教材 ②数字通信—教材 IV. TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第009865号

责任编辑: 谭海平 韩玲玲

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 21 字数: 538千字

印 次: 2007年2月第1次印刷

定 价: 35.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

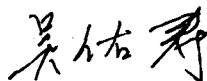
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

## 译者序

本书是一本在北美和其他地区的同行中评价颇高的通信原理入门教材。该书深入浅出地论述了模拟通信和数字通信的基本理论,语言生动,条理清晰,重点突出,对数学公式和例题的讲解通俗易懂但不失严谨,强调通信理论与实际应用的关联,有利于读者掌握通信系统的基础知识并且理论联系实际。

本书的一个显著特点是给出了大量的上机实验练习,这在目前通信原理教材中并不多见。熟悉和掌握 MATLAB 进行上机实验,可以帮助读者通过计算机编程加深对通信理论基本概念及问题的理解,并可借助理论知识用仿真的手段分析和解决通信系统中出现的实际问题。本书的另一个特点是给出了大量的例题和习题,使读者进一步掌握并运用所学到的知识并进行适度的拓展。我们深感这是通信原理入门教材的一部佳作,翻译的过程也是一个学习提高的过程。

考虑到我国高校课程设置的实际情况,经和原书作者及其出版商沟通,本书在翻译过程中对原书内容进行了适当调整。主要有:(1)删去了原书第 2 章“信号和系统的傅里叶表示”,因为我国大多数高校在“信号与系统”课程中已作为重要内容学习过这部分内容;(2)将原书第 8 章“随机信号和噪声”调整为第 2 章,使之作为后续各章的数学基础,对应地将原书第 9 章、第 10 章分别调整为第 8 章、第 9 章;(3)删去了第 11 章“系统和噪声计算”,因为我国大多数高校将会在“通信系统”等后续课程中学习这些内容,删去该章后不但降低了本书的学习难度,而且突出了重点;(4)对原书的 8 个附录保留了 2 个,即原书附录 7“第 7 章~第 10 章习题中上机实验的 MATLAB 脚本”和附录 8“习题答案”。调整后全书共 9 章,2 个附录。

本书由许波、夏玮玮、宋铁成等翻译,分别主要负责第 1 章~第 6 章、第 7 章~第 8 章和第 9 章;田维兴、魏巍、曹晶、常新峰、王坤、许文博、张浩、李维佳、牛群山、赵秋哲和杨琼等分别协助完成了翻译的初稿;许波对全书进行了初步统稿和校对,并负责全部图、表、公式的核对及其他具体工作;最后由沈连丰负责全书的统稿和审校。另外,本书的翻译列入了国家教育部高等理工教育教学改革与实践项目“国家工科电工电子教学基地《通信原理》双语教学课程建设(项目编号:416)”。在此,对所有为本书出版提供帮助的师长和同仁表示诚挚的感谢!

译稿对原书中个别笔误和疏漏之处做了更正。由于译审者水平所限,译文中难免有不妥之处,敬请读者不吝指正。

译者

2007 年 1 月

于东南大学移动通信国家重点实验室

# 前 言

对于电子工程类的大学本科教学计划而言,模拟和数字通信导论是一门基础课程。本课程通常在大学三年级开设,且假定学生已经学习了微积分、电子学、信号与系统(也可能学习了概率论课程)。

鉴于本课程的入门性质,故力求教材在文字上通俗易懂、语言上表述准确,并能包含大量易于理解的例题、习题和上机实验。上述几点都是为了让初学者迅速而有效地掌握通信系统的基础知识而考虑的,而本书始终本着上述想法而写作。

当用数学语言来描述通信理论时,读者有时会忽视通信系统实际应用的一面。在本书中特别注意避免出现这样的问题,对章节做了统筹安排,以使教学处理更易于掌握,并尽可能指出它们与通信理论的关系。

## 本书的结构体系

为了使学生能更快、更好地学习,本书在内容的编排上特别注意了如下几点:

- 如何激发读者阅读和学习的兴趣。
- 强调基于“系统”观点的基本概念,并循序渐进地予以介绍。
- 在每一章的恰当地方给出了实例和上机实验,用于说明相关理论的应用。
- 在论述基本概念后给出了练习题,以使读者检查对基本概念的掌握情况。
- 每章末尾安排了附加习题,其中一些稍有难度的题目可能扩展了本章的理论知识。

## 本书的安排

1. **学习动机** 在深入学习通信理论知识之前,希望读者能够具有使用和学习本书的热情。为此,在第1章的开头介绍了通信系统的历史背景和重要应用。
2. **调制理论** 数字通信已经取代模拟通信成为通信的主流形式。虽然这两种通信以不同的方式工作,但是均以调制理论为基础。如果在理解了应用于模拟通信中的基本概念之后再去学习数字通信,那么对本课程的掌握就会简单很多;另外,振幅调制比角度调制表示起来要简单一些;最后,需要强调的是,傅里叶理论是理解调制理论的基础。基于上述几点,第3章至第7章安排如下:

- 第3章和第4章介绍模拟通信(振幅调制见第3章,角度调制见第4章)。
- 第5章介绍脉冲调制,给出了从模拟通信演化到数字通信的概念。
- 第6章和第7章介绍数字通信(基带数据传输见第6章,带通数据传输见第7章)。

3. **概率论与信号检测** 傅里叶分析是调制理论的基础。同样,概率论是在附加噪声条件下进行信号检测和接收机性能评估的理论基础。第2章回顾了概率论的相关知识并介绍了随机信号和噪声。对模拟通信和数字通信中的调制有了很好的理解并建立了概率论中的相关概念和概率模型后,再来分析模拟和数字通信系统的接收机。概括如下:

- 第 8 章讨论模拟通信系统中的噪声。
- 第 9 章讨论数字通信系统中的噪声。

由于模拟和数字通信系统的工作方式不同,很自然地可以看出这两章在处理噪声影响时的一些根本区别。

4. **典型实例** 为了突出通信理论中重要的实际应用,在恰当的位置引入了典型实例。这些例子都来源于模拟和数字通信的应用。
5. **附录** 为了给教材的正文增加一些辅助内容,在本书的末尾添加了两个附录:
  - 与第 7 章至第 9 章习题配套的上机实验的 MATLAB 脚本程序。
  - 习题答案。
6. **脚注** 有兴趣的读者可以根据脚注寻找精选的参考资料,以便进一步学习。
7. **辅助材料** 本书自成体系。在书的最后附加了作者在编写过程中使用的符号术语表和参考书目。为了便于教师使用本书进行教学,John Wiley and Sons 出版集团将出版与本书配套的习题解答手册,该手册包含了在教材正文中和在章节末尾出现的所有习题的答案。

#### 如何使用本书

本书作为模拟和数字通信入门课程的教材,在使用时可以根据学生背景知识的情况、教师的教学兴趣和教学任务的情况做不同的安排。下面列举两种常见的使用模式:

#### 模式 A: 一门两学期的课程

- (A.1) 第一学期的课程围绕调制理论,包含第 3 章到第 7 章的内容。
- (A.2) 第二学期的课程围绕通信系统中的噪声,包含第 2 章、第 8 章和第 9 章的内容。

#### 模式 B: 两门各一学期的课程

- (B.1) 第一门课程是模拟通信。首先讲解第 3 章(振幅调制)和第 4 章(角度调制),接着学习第 2 章中噪声的基础知识,最后在第 8 章中研究模拟通信中的噪声。
- (B.2) 第二门课程是数字通信。首先讲解第 5 章(脉冲调制),然后是第 6 章(基带数据传输)和第 7 章(数字调制技术),接着学习第 2 章中概率论的相关知识,最后在第 9 章中研究数字通信中的噪声。

Simon Haykin  
Ancaster, 安大略湖, 加拿大

Michael Moher  
渥太华, 安大略湖, 加拿大



## 致 谢

本书的顺利完成,得益于许多人士的帮助,在此表示深深的谢意。

- 感谢曾在 McMaster 大学工作过的 Lily Jiang,本书的许多上机实验均是由她进行验证的。
- 感谢 Wei Zhang 对本书不足之处做出的修正及对内容的完善。

也要感谢渥太华通信研究中心的两位博士——Stewart Crozier 和 Paul Guinand,他们对本书的许多内容提出了宝贵意见。

同样要感谢 John Wiley and Sons 出版集团的高级策划编辑兼产品经理(工程与计算机科学)Catherine Fields Shultz、曾就职于 Wiley 出版集团的 Bill Zobrist,以及现任 Wiley 出版集团的高级制作编辑 Lisa Wojcik,衷心感谢他们对本书出版做出的努力与指导。

最后,诚挚感谢 McMaster 大学的 Lola Brooks,她为本书手稿的准备及出版成书做了大量艰苦的工作。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 历史背景 .....	1
1.2 应用情况 .....	4
1.3 主要资源和工作要求 .....	11
1.4 通信系统的基本原理 .....	12
1.5 推论 .....	13
<b>第 2 章 随机信号和噪声</b> .....	15
2.1 概率和随机变量 .....	15
2.2 期望 .....	25
2.3 随机变量的变换 .....	28
2.4 高斯随机变量 .....	29
2.5 中心极限定理 .....	32
2.6 随机过程 .....	34
2.7 随机过程的相关 .....	36
2.8 随机信号的频谱 .....	40
2.9 高斯过程 .....	44
2.10 白噪声 .....	45
2.11 窄带噪声 .....	48
2.12 总结和讨论 .....	52
附加习题 .....	53
选做习题 .....	56
<b>第 3 章 振幅调制</b> .....	59
3.1 振幅调制 .....	59
3.2 振幅调制的优缺点及其改进 .....	70
3.3 抑制载波双边带调制 .....	71
3.4 Costas 接收机 .....	76
3.5 正交载波复用技术 .....	77
3.6 单边带调制 .....	79
3.7 残留边带调制 .....	85
3.8 已调波和带通滤波器的基带表示 .....	90
3.9 典型实例 .....	94
3.10 总结和讨论 .....	99
附加习题 .....	99
选做习题 .....	101
<b>第 4 章 角度调制</b> .....	103
4.1 基本定义 .....	103

4.2	调角波的性质 .....	105
4.3	PM 波形和 FM 波形之间的关系 .....	109
4.4	窄带频率调制 .....	109
4.5	宽带频率调制 .....	113
4.6	FM 波形的传输带宽 .....	117
4.7	FM 波形的产生 .....	120
4.8	FM 信号的解调 .....	121
4.9	典型实例:FM 立体声复用 .....	128
4.10	总结和讨论 .....	130
	附加习题 .....	130
	选做习题 .....	132
<b>第 5 章</b>	<b>脉冲调制:从模拟到数字通信的过渡 .....</b>	<b>135</b>
5.1	采样过程 .....	135
5.2	脉冲幅度调制 .....	141
5.3	脉冲位置调制 .....	144
5.4	完成模拟到数字的过渡 .....	146
5.5	量化过程 .....	147
5.6	脉冲编码调制 .....	148
5.7	增量调制 .....	152
5.8	差分脉冲编码调制 .....	157
5.9	线性码 .....	159
5.10	典型实例 .....	160
5.11	总结和讨论 .....	163
	附加习题 .....	164
	选做习题 .....	166
<b>第 6 章</b>	<b>基带信号传输 .....</b>	<b>168</b>
6.1	数字数据的基带传输 .....	168
6.2	码间串扰问题 .....	170
6.3	奈奎斯特信道 .....	171
6.4	升余弦脉冲频谱 .....	173
6.5	$M$ 进制数据的基带传输 .....	179
6.6	眼图 .....	180
6.7	上机实验:二进制和四进制系统的眼图 .....	183
6.8	典型实例:均衡 .....	184
6.9	总结和讨论 .....	189
	附加习题 .....	189
	选做习题 .....	191
<b>第 7 章</b>	<b>数字带通调制技术 .....</b>	<b>194</b>
7.1	预备知识 .....	194
7.2	二进制幅移键控 .....	196
7.3	相移键控 .....	201

7.4	频移键控 .....	211
7.5	三种二进制调制方案的总结 .....	218
7.6	非相干数字调制方案 .....	220
7.7	$M$ 进制数字调制方案 .....	223
7.8	数字已调波到信号点星座图的映射 .....	227
7.9	典型实例 .....	229
7.10	总结和讨论 .....	234
	附加习题 .....	236
	选做习题 .....	237
<b>第 8 章</b>	<b>模拟通信中的噪声</b> .....	<b>239</b>
8.1	通信系统中的噪声 .....	239
8.2	信噪比 .....	240
8.3	带通接收端结构 .....	243
8.4	使用相干检波的线性接收机的噪声 .....	244
8.5	使用包络检波的 AM 接收机的噪声 .....	247
8.6	SSB 接收机中的噪声 .....	250
8.7	FM 检波 .....	252
8.8	FM 的预加重和去加重 .....	259
8.9	总结和讨论 .....	261
	附加习题 .....	261
	选做习题 .....	263
<b>第 9 章</b>	<b>数字通信中的噪声</b> .....	<b>264</b>
9.1	误比特率 .....	264
9.2	噪声中单脉冲的检测 .....	266
9.3	噪声中二进制 PAM 的最佳检测 .....	269
9.4	BPSK 检测的优化 .....	274
9.5	噪声中 QPSK 和 QAM 的检测 .....	277
9.6	二进制 FSK 的优化检测 .....	282
9.7	噪声中的差分检测 .....	284
9.8	数字性能的小结 .....	286
9.9	检错和纠错 .....	290
9.10	总结和讨论 .....	299
	附加习题 .....	300
	选做习题 .....	301
<b>附录 1</b>	<b>第 2 章、第 7 章至第 9 章习题中上机实验的 MATLAB 脚本</b> .....	<b>303</b>
<b>附录 2</b>	<b>部分选做习题答案</b> .....	<b>311</b>
<b>术语表</b>	.....	<b>315</b>
<b>缩写词</b>	.....	<b>316</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>317</b>

# 第1章 绪论

欲真正掌握一门科学,就必须先了解它的历史。

——Auguste Comte(1798 - 1857)

## 1.1 历史背景

正如 Auguste Comte 所说,要想更好地掌握模拟和数字通信导论这门课程,首先应该从历史的角度去考察通信系统的发展渊源<sup>①</sup>。本节的每个标题都是通信历史演化中的重大和有密切联系的历史事件。

### 电报

电报是由画家 Samuel Morse 发明的。1844 年, Morse 成功地通过电子电报将“*What hath God wrought*”(上帝创造了什么)这句话从华盛顿传到马里兰州的巴尔的摩。这是通信史上一次彻底的革命。至此,能够实现实时、远距离通信的方法诞生了。这种适合于人工发送的电报正是现代数字通信的最早形式,特别要注意, Morse 码是一种使用 4 个字符的变长编码方式,这 4 种字符为点、划、字母空格和字空格。较频繁出现的字母用短序列表示,不常出现的字母用长序列表示。

### 无线电

1864 年, James Clerk Maxwell 创立了光的电磁理论, 预测到无线电波的存在, 同时建立了以他的名字命名的方程组(即麦克斯韦方程组)。1887 年, Heinrich Hertz 通过实验证明了无线电波的存在。1894 年, Oliver Lodge 演示了基于相对较短的距离(150 码)的无线通信。1901 年 12 月 12 日, 在纽芬兰的信号丘, Guglielmo Marconi 接收到了一个无线电信号, 这个信号产生于大西洋彼岸、相距 1700 英里的英格兰的康沃尔郡。这种方式极大地拓宽了通信的范围。1906 年, Reginald Fessenden(一位自学成才的大学教师)成功地发送了世界上第一个无线电广播。至此, 通信历史又翻开了崭新的一页。

1918 年, Edwin H. Armstrong 发明了超外差接收机。迄今为止, 几乎所有的无线电接收机都还是这种类型的。1933 年, Armstrong 论证了另一种具有划时代意义的概念, 即一种被他称为频率调制(FM, Frequency Modulation)的调制方案。1936 年, 他发表了关于调频无线电通信的论文。

### 电话

1875 年, 世界上的第一台电话机诞生了。它是由一位耳聋的教师 Alexander Graham Bell 发明的。通过电子编码和对声音的复制再现, 电话实现了对语音的实时传输。第一代电话所使用的技术很不成熟, 只能实现短距离通话。电话仅仅出现几年后, 人们就开始研究如何实现电话服务的自动化。1897 年, 一位来自密苏里州肯萨斯市的企业家 A. B. Strowger, 设计了一款以他的名字命名的自动步进交换机。在后来发明的所有机电交换机中, Strowger 交换机的应用最为流行和普遍。

<sup>①</sup> “历史背景”这部分改编自 Haykin(2001)。

## 电子学

1904年, John Ambrose Fleming 发明了真空二极管, 这为 Lee de Forest 在 1906 年发明真空三极管奠定了基础。真空三极管的发明对于 1913 年开发出能够横贯大陆的电话技术有巨大的推动作用, 同时它也揭开了无线语音通信的序幕。确实, 在晶体管发明和完善之前, 真空三极管在电子放大器的设计中是最重要的元件。

1948年, Walter H. Brattain, John Bardeen 和 William Shockley 三人在贝尔实验室共同发明了晶体管。1958年, Robert Noyce 发明了第一块以硅为材料制作的集成电路(IC, Integrated Circuit)。固态设备(晶体管属于固态元件, 而真空管不属于固态元件)和集成电路的划时代革新, 带来了超大规模集成电路(VLSI)及单片机的诞生, 正是这些技术永远地改变了信号处理和电信产业。

## 电视

Philo T. Farnsworth 于 1928 年、Vladimir K. Zworykin 于 1929 年分别发明了第一个全电子电视系统。1939年, 英国广播公司(BBC, British Broadcasting Corporation)开始播放以商业为目的的广播电视节目。

## 数字通信

1928年, Harry Nyquist 发表了一篇关于电报中信号传输理论的经典论文。特别要提到的是, Nyquist 制定了在不考虑噪声的情况下, 电报信号通过色散信道后实现正确接收的标准。Nyquist 的许多早期理论在后来都应用于数字化的数据在色散信道中的传输。

1937年, Alex Reeves 发明了脉冲编码调制(PCM, Pulse-Code Modulation), 它被广泛应用于对语音信号的数字编码。由于能够对语音信号进行加密, 这项技术在二战中得到了极大的发展(在战争后期, 基于该技术的一个共有 24 个频道的系统被美国军队应用于战场), 但是直到晶体管出现和随后的大规模集成电路快速发展时, PCM 才开始在商业上得到开发和利用。

1948年, 晶体管的发明极大地促进了电子学在交换机和数字通信中的应用。使用晶体管可以改进系统的可靠性, 增加系统容量, 同时降低成本。1958年3月, 在贝尔实验室第一次实现了通过程控系统进行的通话。1960年6月, 在伊利诺斯州的莫里斯市, 第一台使用数字交换机的商业电话服务投入使用。1962年, 第一台 T-1 载波传输系统在贝尔实验室投入安装使用。

1943年, D. O. North 发明了匹配滤波器, 用于在加性白噪声环境中实现对已知信号的最佳检测。1946年, J. H. Van Vleck 和 D. Middleton 也取得了类似的成果, 他们将其命名为“匹配滤波器”。

1948年, Claude Shannon 的一篇名为“通信的一个数学理论”(A Mathematical Theory of Communication)的论文奠定了数字通信的理论基础。Shannon 的这篇论文立刻得到了很高的评价。也许正因为如此巨大的反响, 一年之后, 这篇论文在一本与 Warren Weaver 合著的书中出现时, Shannon 把论文标题改为“通信的数学理论”(The Mathematical Theory of Communications)。值得注意的是, 在 1948 年 Shannon 发表这篇经典论文之前, 人们都认为, 在信道中如果信息传输速率增加, 差错概率就会随之增加。当 Shannon 证明了在信息传输速率小于信道容量条件下以上结论并不成立时, 整个通信理论界都为之震惊。

## 计算机网络

1943年到1946年期间,在J. Presper Eckert, Jr. 和 John W. Mauchly的技术指导下,第一台名为“ENIAC”的电子数字计算机在宾夕法尼亚大学工程系摩尔学院诞生。而 John von Neumann 的贡献主要是对数字计算机的理论、设计、应用提出了最早和最基本的描述,这些都可以在他于1945年写的报告的第一份草案中看到。20世纪50年代初期,人们实现了计算机与其终端的远距离交互通信。早期使用的链路建立在语音级别的电话信道上,传输速率仅有300~1200 bps。后来,随着通信技术的全面发展,数据传输速率以惊人的速度增加。其中有重大影响力的有:1965年,由 Robert Lucky 提出的自适应均衡;1982年,由 G. Ungerboeck 倡导的有效调制技术。另外,自动请求重传机制(ARQ, Automatic Repeat Request)在计算机通信中也获得了广泛的应用。ARQ方法最初是在第二次世界大战期间由 H. C. A. van Duuren 提出,并于1946年正式发表。它被用来改进无线电报技术,使得电报能够进行长距离传输。

从1950年至1970年期间,先后涌现了许多关于计算机网络的学术研究。其中对计算机通信影响最为深远的当属在1971年开始提供服务的高级研究计划署网络(ARPANET, Advanced Research Projects Agency Network),它由美国国防部高级研究计划署建立,而分组交换技术的前期工作正是在 ARPANET 上完成的。1985年,ARPANET 更名为因特网(Internet)。1990年,Internet 的发展发生了重大的转折,当时 Tim Berners-Lee 提出了一个面向 Internet 的超媒体软件界面,并将其命名为万维网。在短短的两年时间里,Internet 从原本不存在发展到全世界无人不晓的地步。Internet 于1994年在其商业化后达到巅峰,这可以用以下的原因来解释它何以实现爆炸式的发展:

- ▶ 在网络出现之前,有利于其诞生并发展的因素早已存在。特别是,随着超大规模集成电路的发展,个人电脑在全世界得到了普及,越来越多的人通过安装调制解调器来实现同外部世界的交流。
- ▶ 近20年来,Internet 获得了稳定的发展(虽然只局限于一定的用户群体),电子邮件和文件传输等应用已接近普及。
- ▶ 文件描述和传输的标准、超文本标记语言(HTML, Hypertext Markup Language)及超文本传输协议(HTTP, Hypertext Transfer Protocol)已被采用。

因而,除了需要一个简单的用户界面和一个崭新的服务概念这两个至关重要的因素外,万维网出现所需的其他条件均已得到满足。

## 卫星通信

1955年,John R. Pierce 提出利用卫星来实现通信。而 Arthur C. Clark 早在1945年就发表了一篇论文,提出把地球轨道卫星作为中继站来实现地球上两个站点之间的通信。1957年苏联发射了人造地球卫星1号,传送遥感勘测信号长达21天。随后不久,美国于1958年发射了开拓者1号,传送遥感勘测信号长达5个月。通信卫星技术发展的一个最重要的实验阶段是于1962年7月10日在卡纳维拉尔角发射了通信卫星1号。贝尔实验室的科学家们从 Pierce 所做的开拓性工作中汲取了大量知识,制造了该枚卫星,使之能够借助于微波接收器和巨型天线横跨大西洋传输电视节目。

## 光纤通信

利用光来传递信息的方法可以追溯到史前时代(如烽火信号)。但是长期以来,光通信都

没有任何突破性进展。直到 1966 年,英国标准电话实验室的 K. C. Kao 和 G. A. Hockham 提出了利用覆膜玻璃纤维来作为绝缘波导管。激光在 1959 年和 1960 年被发明并获得了发展。当时,Kao 和 Hockham 做出了如下的预测:

- (1) 光纤信道中信号的衰落主要是由玻璃中的杂质引起的。
- (2) 由瑞利散射引起的固有损耗很小,预测该损耗可以达到 20 dB/km 左右。

该预测是在当时玻璃纤维中功率损耗高达约 1000 dB/km 的情况下做出的,这个伟大的假想在数年后得到了证实。现在,传输损耗可以低至 0.1 dB/km。

微电子、数字计算机和光波系统等领域过去、现在及将来的巨大发展都会对数字通信造成巨大的影响。许多深刻的变革已经发生,更多的变革会在不久的将来继续影响着人类生活的方方面面。

## 1.2 应用情况

1.1 节所述的历史背景提到了通信系统的诸多应用领域,其中的一些应用(如电报)最早诞生但正逐渐走向衰落,而另外一些应用(如 Internet)则是方兴未艾。本节将主要介绍现今生活中仍占主导地位的无线电通信和通信网络,其典型是电话和 Internet。这些应用可以概括如下:

- ▶ 广播,通过使用单个高功率发射机和无数个成本相对低廉的接收机来实现。在这种通信系统中,承载信息的信号只能单向传输,从发射机传送到覆盖范围内的每个接收机。
- ▶ 点对点通信,通过在发射机和接收机之间建立一一对应的链路来实现。在这种通信系统中,承载信息的信号可以双向传输。正因为如此,在通信链路的每一端都同时需要发射机和接收机(亦即收/发信机)。

图 1.1 给出了通信系统的基本组成单元。其中,发射机将信息源产生的消息信号转换成适合在信道中传输的形式;信道的主要作用是传输消息信号,即将消息信号传送到接收机,但它的非理想特性往往会导致信号在传输过程中出现失真,此外,噪声和干扰信号(源自其他信息源)也会叠加到信道的输出,从而导致接收信号和发送信号不一致;接收机的主要作用是对接收到的信号进行处理,还原成发送端的消息信号并传送给受信者,由于信道的非理想特性及噪声和外界干扰的影响,接收机输出端的信号和发射机输入端的信号不可避免地存在着一些细微的差别,因此这种还原实质上是一种估计。

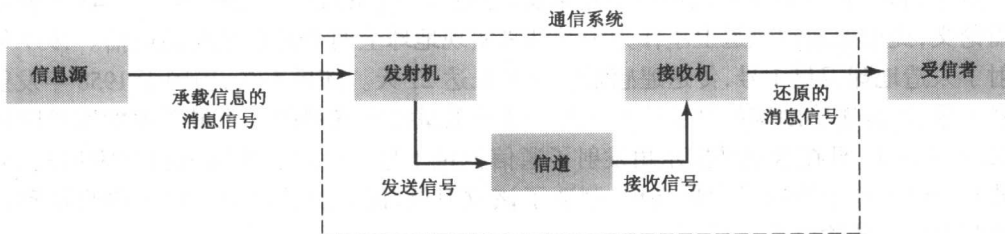


图 1.1 通信系统的框图



## ■ 无线电

一般来说,无线电按照用法可以包括广播和点对点通信两种方式。

人们对 AM 收音机和 FM 收音机已经非常熟悉了,AM 代表振幅调制(Amplitude Modulation),FM 代表频率调制(Frequency Modulation)。现在它们完全可以集成在一个设备中,并可以应用于每个家庭、每辆汽车。通过无线电广播,可以了解到许多当地、本国甚至国际上的新闻、时事评论、音乐及天气预报等各种资讯,这些消息都来自于相隔不远的广播电台。传统的 AM 无线电设备和 FM 无线电设备都利用模拟电子器件来制造,但是,由于数字电子器件的快速发展和低廉的成本,如今数字无线电(AM 和 FM 方式)已经被广泛使用。

无线电通过电信号来传送声音。电视也是基于相似的电磁学和通信理论的原理,它也通过电信号来传送可视图像。声音信号一般可以通过一维时间函数来描述,因此比较容易进行信号处理,而运动的图像需要二维时间函数来描述,故其信号处理就比较复杂。具体地说,可以把每个瞬时的图像视为一帧,每帧又可以划分为许多小块,称之为图像元素或者像素,描述图像的像素越多,图像的分辨率也就越高。通过有次序地对像素进行扫描,图像中所包含的信息被转换为电信号,电信号的强弱和每个像素的亮度成正比,在扫描器输出端生成的电子信号即为发送的视频信号。接收机已知定义明确的映射过程,正是依照这个映射过程生成相应的视频信号。于是,只要给定一个视频信号,接收机就能够重现原始图像。如同数字无线电技术一样,电视也是数字电子技术的巨大发展的受益者。数字电子技术的巨大发展、先进数字信号处理技术的应用及消费者的需求共同刺激了高清电视(HDTV, High-Definition TV)的发展。高清电视可以极大地改进接收机输出端重现图像的质量。

在点对点通信领域,无线电也已经通过卫星通信和无线通信这两种途径很显著地影响着人们的日常生活。卫星通信是围绕着地球同步轨道卫星建立起来的,卫星的工作依赖于在其上行链路和下行链路上的视线无线电传播。上行链路连接了地面终端与卫星上的转发器(即一种电子电路系统),而下行链路连接了转发器与另一个地面终端。因此,如图 1.2 所示,承载信息的信号通过上行链路从地面终端发送到卫星,在转发器中放大后,再通过下行链路从卫星重新发送到另一个地面终端。这样,卫星通信系统就具有了全球覆盖的特性。

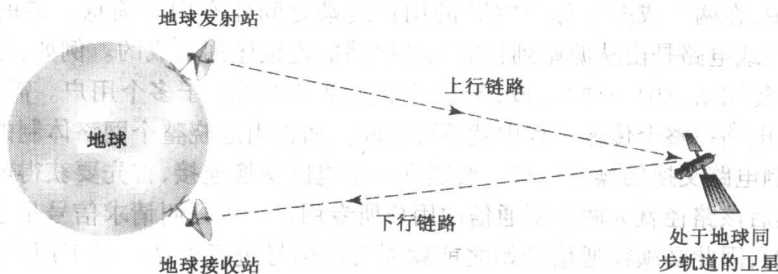


图 1.2 卫星通信系统

从不是很严格的意义上讲,移动通信和卫星通信的运行方式很相似。移动通信也包含一条下行链路和一条上行链路,下行链路负责的是从基站到移动用户的前向链路无线电传输,上行链路负责的是从移动用户到基站的反向链路无线电传输。与卫星通信不同的是,移动通信受到多径效应的影响。多径效应是由传播路径上的物体(如建筑物、树木等)对发送信